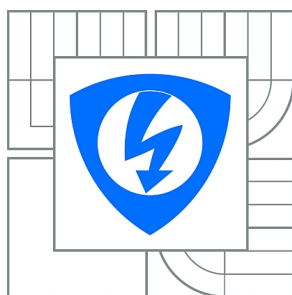




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VYUŽITÍ PRVKŮ CDTA A CFTA V ELEKTRONICKÝCH OBVODECH A KMITOČTOVÝCH FILTRECH

UTILIZATION OF CDTA AND CFTA ELEMENTS IN ELECTRICAL CIRCUITS AND FREQUENCY
FILTERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR KOTLÁN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID KUBÁNEK, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Petr Kotlán

ID: 78644

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Využití prvků CDTA a CFTA v elektronických obvodech a kmitočtových filtrech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti využití aktivních prvků CDTA a CFTA v analogových elektronických obvodech, zejména v kmitočtových filtrech. Všímněte si souvislosti mezi těmito prvky a proudovým operačním zesilovačem. Zhodnoťte vlastnosti stávajících zapojení a proveďte funkci vybraných obvodů počítačovou simulací. Vhodný obvod prakticky realizujte a proveďte měření jeho vlastností.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Biolek, D., Biolková, V. Prvek CDTA pro analogové zpracování signálů. NSSS VII, Tatranské Zruby, 2004, s. 160-163

[2] Herencsár, N., Koton, J., Vrba, K. Univerzální kmitočtový filtr s novými proudovými prvky CFTA. Elektrotechnika - Internetový časopis (<http://www.elektrotechnika.cz>), roč. 2009, č. 57, ISSN: 1213-1539

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. David Kubánek, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ANOTACE

Práce pojednává o aktivních prvcích v proudovém módu CDTA (current differencing transconductance amplifier) a CFTA (current follower transconductance amplifier). CDTA je prvek, jenž porovnává dva vstupní proudy. Výsledný proud vystupuje přes přídavnou svorku Z na zátěž. Vzniklé napětí je přes transkonduktanci g převedeno na výstupní proud, který může být kladný ($X+$ výstup) nebo záporný ($X-$ výstup). CFTA využívá narozdíl od CDTA jen jeden proudový vstup.

Je ukázáno aplikační využití prvků v kmitočtových filtrech a oscilátorech. Bylo navrženo několik filtrů 2. řádu realizující zároveň dolní, horní i pásmovou propust. Dále pak byla ukázána možnost převést filtry v různých topologiích s operačním zesilovačem na filtry s prvky CDTA a CFTA. Také byly navrženy oscilátory s využitím prvků CDTA a CFTA.

Navržené obvody byly odsimulovány. Za účelem simulace byly vytvořeny tranzistorové modely prvků. Prvky je též možno realizovat pomocí součástek AD844 a MAX435. Střídavou analýzou byly ukázány modulové charakteristiky daných filtrů a v časové analýze ukázány průběhy výstupu oscilátorů.

Součástí práce byla praktická realizace kmitočtového filtru druhého řádu s prvkem CFTA. Zařízení bylo uděláno jako deska plošných spojů v smd variantě. CFTA byl realizován pomocí prvků AD844 a MAX435.

Klíčová slova: CDTA, CFTA, kmitočtový filtr, oscilátor, AD844, MAX43

ABSTRACT

Thesis deals about active component in current mode, CDTA (current differencing transconductance amplifier) and CFTA (current follower transconductance amplifier). CDTA compares two input currents. Outcome current comes trough added terminal Z to load. Caused voltage is transfered to output current by transconductance g . Output currents shall be possitive (terminal $X+$) or negative (terminal $X-$). In contrast to CDTA, CFTA has one current input.

Components were used in filters and oscillators. Some filters of second order realized simultaneously low, hight and nad pass were designed. Then, the transfer of filters with diverse topology with opperational amplifier to filter with CDTA and CFTA was shown. Some oscillators were designed.

Designed circuits were simulated. Transistor models of CDTA and CFTA were created to purpose of simulation. This components can be realized by AD844 and MAX435. There are shown the conclusions of AC analysis of filters and transission analysis of oscillators.

The thesis contains practical realization of second order frequency filter also. Device was made like a PCB by smd. CFTA was realized by components AD844 and MAX435.

Keywords: CDTA, CFTA, frequency filter, oscillator, AD844, MAX435

KOTLÁN, P. *Využití prvků CDTA a CFTA v elektronických obvodech a kmitočtových filtrech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 43 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Kubánek, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Využití prvků CDTA a CFTA v elektronických obvodech a kmitočtových filtrech“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 24.5. 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Davidu Kubánkovi Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 24.5. 2011

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	7
1 Teorie prvků CDTA a CFTA	8
1.1 CDTA	8
1.2 CFTA.....	11
2 CDTA v elektrických obvodech	14
2.1 Kmitočtové filtry.....	14
2.1.1 Multifunkční kmitočtový filtr s jedním CDTA.....	14
2.1.2 Multifunkční kmitočtový filtr se dvěma CDTA	15
2.1.3 Topologie dva integrátory ve smyčce.....	16
2.1.4 KHN	18
2.2 Oscilátory.....	20
3 Využití CFTA	21
3.1 Kmitočtové filtry.....	21
3.2 Oscilátory.....	24
4 Simulace	26
4.1 Knihovny prvků	26
4.2 Výsledky simulace	28
5 Praktická realizace	37
5.1 Schéma zapojení	38
5.2 Návrh desky	39
5.3 Seznam součástek.....	40
5.4 Měření.....	40
6 Závěr	41
Literatura	42
Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů	43

ÚVOD

Tato diplomová práce pojednává o prvcích CDTA (current differential transconductance amplifier) a CFTA (current follower transconductance amplifier) a jejich využití v elektronických obvodech, především kmotočtových filtrech a dále oscilátorech.

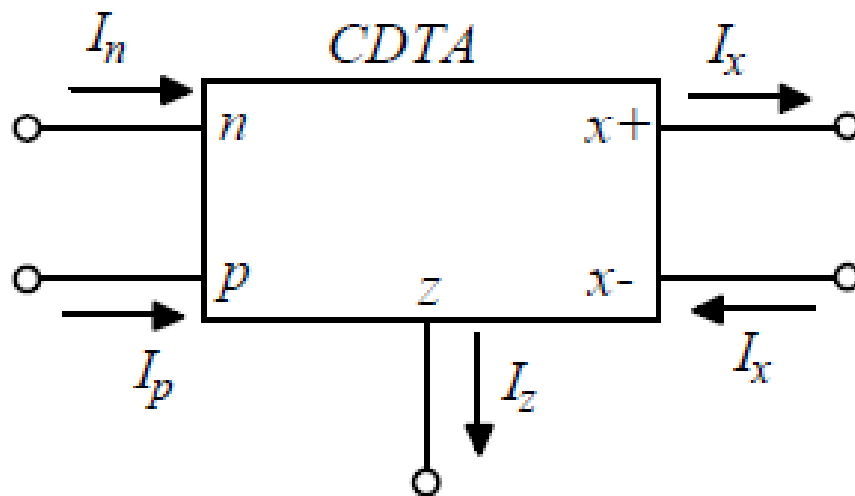
Text je členěn do 5 základních částí. Kapitola 1 popisuje vlastnosti zmíněných prvků, kapitola 2 aplikační využití CDTA, kapitola 3 aplikační využití prvků CFTA, v kapitole 4 je demonstrována funkčnost navržených obvodů pomocí analýz a v poslední části je popsána praktická realizace vybraného obvodu.

1 TEORIE PRVKŮ CDTA A CFTA

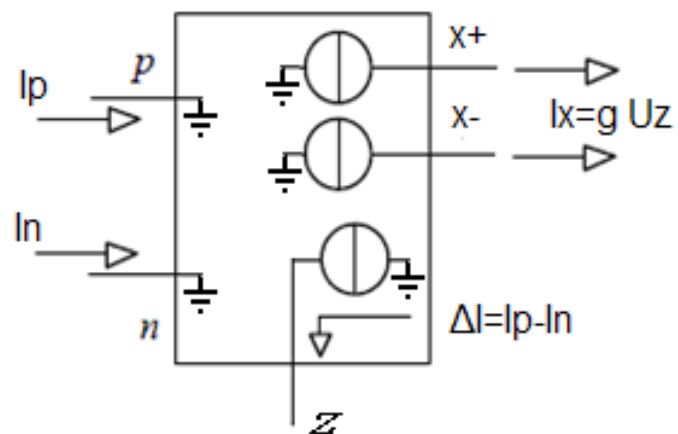
V následujícím textu jsou představeny moderní zesilovací prvky CDTA a CFTA, jejichž vlastnosti budeme dále zkoumat a budeme se snažit vhodně je využít v elektrických obvodech.

1.1 CDTA

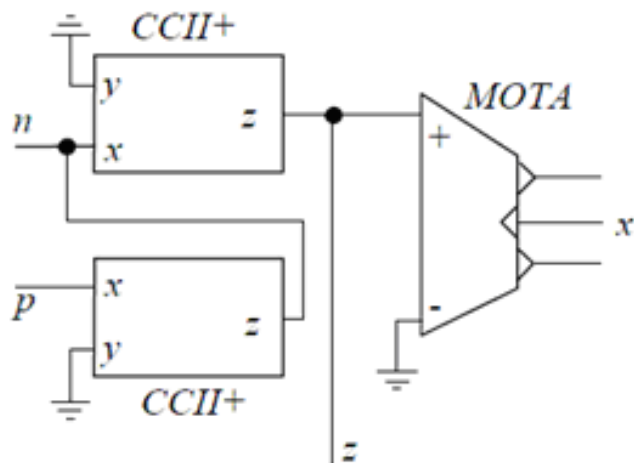
CDTA (Current-Differencing Transconductance Amplifier) vznikl syntézou prvků CDS (Current-Differencing Source) a OTA (Operational Transconductance Amplifier)[1]. Jde o prvek pracující v proudovém módu. Proudový mód je výhodný, jelikož je možné udržet dostatečný odstup signál/šum při sníženém napájecím napětí. Jde o aktivní prvek se dvěma diferenčními nízkoimpedančními proudovými vstupy P a N. Rozdíl vstupních proudů I_p a I_n vytéká ze svorky Z do vnější zátěže. Napětí vzniklé na svorce Z je převedeno přes transkonduktanci g na výstupy X, které mohou být kladné, záporné či smíšené (CDTA ++, CDTA--, CDTA+-). Je zavedena schématická značka prvku CDTA, jak je zobrazeno na obr. 1. Na obrázku 2 je zobrazen behaviorální model. Realizaci pomocí průmyslově známých prvků lze provést pomocí dvou proudových konvektorů a operačního transkonduktančního zesilovače, jak je patrné na obr. 3. Využijeme k tomu prvky 2 krát AD 844 a prvek MAX 435 [2].



Obr. 1: Model prvku CDTA.



Obr. 2: Behaviorální model CDTA.



Obr. 3: Možná realizace prvku CDTA.

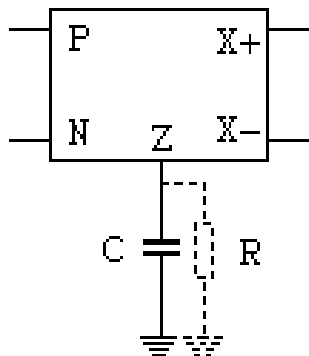
Pro jednotlivé terminály prvku platí následující rovnice.

$$U_p = U_n = 0; I_z = I_p - I_n; I_{x+} = I_{x-} = gU_z \quad (1)$$

Vztahy mezi jednotlivými terminály lze zobrazit pomocí matice.

$$\begin{pmatrix} I_Z \\ I_{X+} \\ I_{X-} \\ U_P \\ U_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_Z \\ U_{X+} \\ U_{X-} \\ I_P \\ I_N \end{pmatrix} \quad (2)$$

Na svorku Z je možné připojit uzemněný kapacitor viz obr. 4. Vznikne tak ideální proudový integrátor. Připojením paralelní kombinace kapacitoru a rezistoru vznikne ztrátový proudová integrátor. Může být invertující i neinvertující s možností sečtení vstupních proudů na svorkách p a n . Sečítání proudových signálů se dosáhne jednoduše pospojováním příslušných vodičů, kterými tečou proudy. Dělení proudů je proveditelné pomocí impedančních děličů proudů.

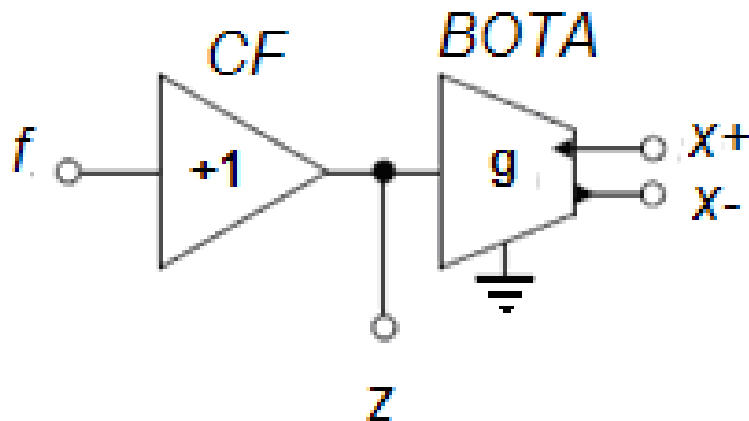


Obr. 4: Proudový integrátor realizovaný prvkem CDTA

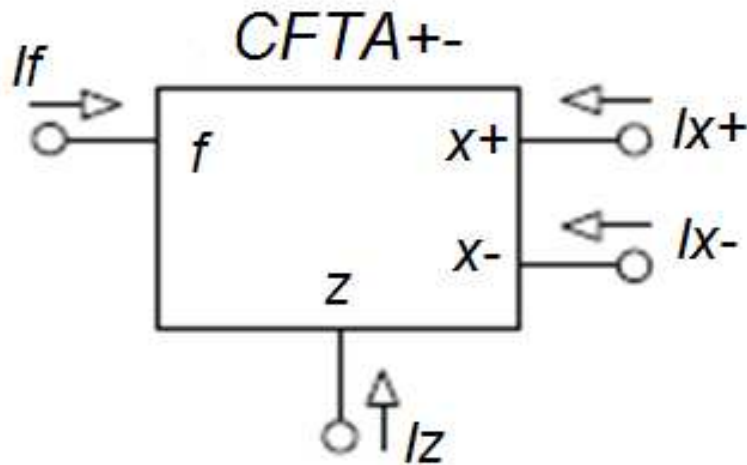
S pomocí prvku CDTA je možné realizovat celou řadu obvodů, jako jsou: analogové aktivní a příčkové filtry, analogové násobičky, oscilátory, komparátory, usměrňovače, imitační invertory, atd. [3].

1.2 CFTA

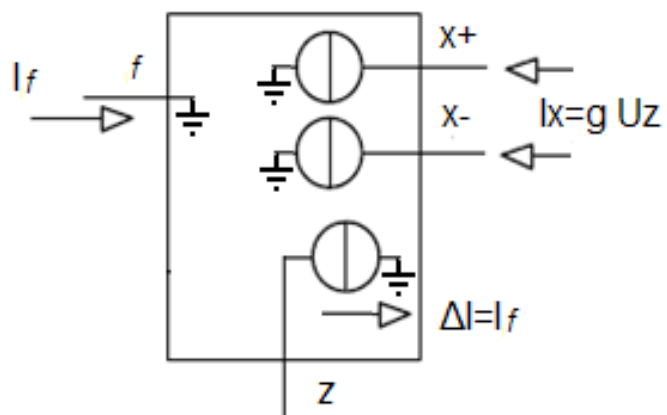
Prvek CFTA (Current Follower Transconductance Amplifier) vznikl kombinací proudového sledovače (CF), který tvoří vstup a transkonduktančního zesilovače (OTA), tvořícího výstup [4], jak je ukázáno na obrázku 5. Model je uveden na obrázku 6, behaviorální model na obrázku 7 a realizace pomocí průmyslově dostupných součástek AD844 a MAX435, znázorněná na obrázku 8. Prvek má jeden nízkoimpedanční proudový vstup f . Z něj se proud přes proudový sledovač přenáší na pomocnou svorku Z . Napětí U_Z na této svorce je přes transkonduktanci g převedeno na proudy tekoucí do výstupních svorek X .



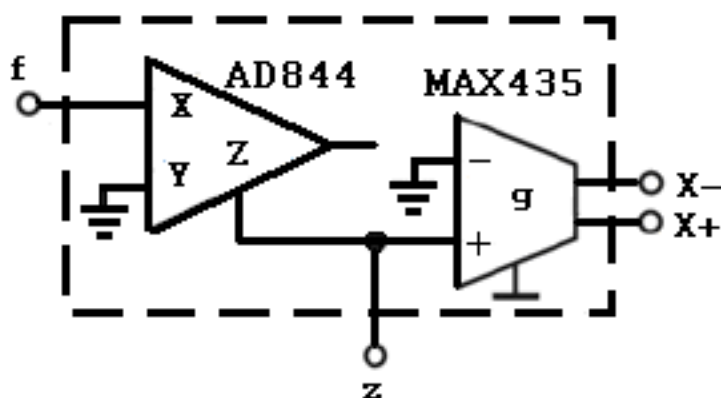
Obr. 5: Prvek CFTA.



Obr. 6: Schématická značka CFTA.



Obr. 7: Behaviorální model prvku CFTA.



Obr. 8: Realizace prvku CFTA pomocí průmyslově dostupných prvků.

Obvod lze popsat pomocí soustavy rovnic (3) a z nich odvoditelnou maticí popisující vztahy mezi terminály (4).

$$U_f = 0; I_z = I_f; I_{x+} = -I_{x-} = gU_z \quad (3)$$

Maticová rovnice popisuje vztahy mezi terminály

$$\begin{pmatrix} I_Z \\ I_{X+} \\ I_{X-} \\ U_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ g_m & 0 & 0 & 0 \\ g_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_Z \\ U_X \\ U_{X-} \\ I_f \end{pmatrix} \quad (4)$$

Prvek CFTA je zjednodušenou variantou obvodu CDTA a jeho aplikace je výhodnější, jelikož bylo zjištěno, že CDTA je zbytečně obvodově složitý a jednoduchou úpravou zapojení s CDTA lze nahradit prvkem s CFTA [4].

2 CDTA V ELEKTRICKÝCH OBVODECH

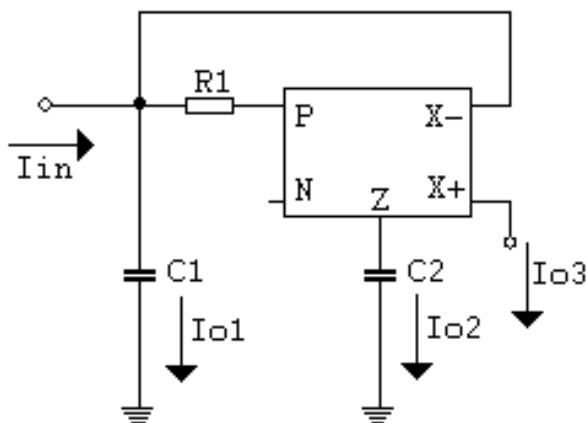
V této kapitole je nastíněno základní aplikační využití prvku CDTA v kmitočtových filtrech a oscilátorech.

2.1 Kmitočtové filtry

Různé struktury pasivních i aktivních filtrů je možné realizovat pomocí prvků CDTA. Jsou znázorněny dva filtry s výstupy umožňujícími dolní, horní i pásmovou propust, navržené obecně známou metodou autonomních obvodů. Dále je ukázána možnost transformace kmitočtového filtru s operačními zesilovači v napěťovém módu na filtr s CDTA v proudovém módu.

2.1.1 Multifunkční kmitočtový filtr s jedním CDTA

Byl navržen autonomní obvod s jedním prvkem a třemi admitančními prvky, z nichž jeden je přes svorku Z uzemněn a dva tvoří vstupní proudový dělič. Bylo zjištěno, že po dosazení dvou kondenzátorů a jednoho rezistoru je možné realizovat filtr typu dolní, horní i pásmová propust.



Obr. 9: Multifunkční filtr s jedním CDTA.

Programem Snap [5] byla zjištěna charakteristická rovnice filtru (5) a proudové přenosové funkce pro jednotlivé výstupy (6, 7, 8). Následně byly odvozeny vzorce pro výpočet charakteristického kmitočtu a činitele jakosti (9, 10). Z přenosových funkcí je patrné, že uvedený filtr lze realizovat v dolní propusti (proud snímáný na výstupu3), horní propusti (výstup Io1) a pásmové propusti (výstup Io2).

$$D(p) = p^2(C_1 R_1 C_2) + p(C_2) + g \quad (5)$$

$$K_{i1} = \frac{I_{o1}}{I_{IN}} = \frac{p^2(C_1 C_2)}{D(p)} \quad (6)$$

$$K_{i2} = \frac{I_{o2}}{I_{IN}} = \frac{p(g_1 C_2)}{D(p)} \quad (7)$$

$$K_{i3} = \frac{I_{o3}}{I_{IN}} = \frac{g_1}{D(p)} \quad (8)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{C_1 R_1 C_2}} \quad (9)$$

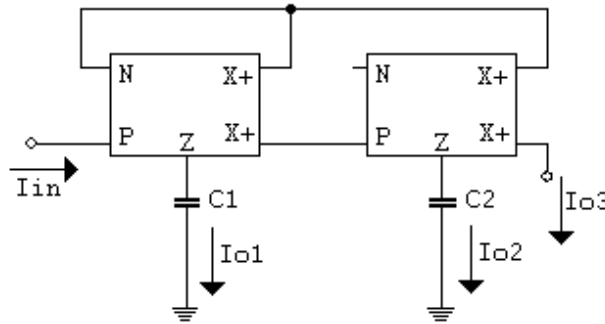
$$Q_0 = \frac{1}{C_2} \sqrt{g C_1 R_1 C_2} \quad (10)$$

Obvod je navržen pro charakteristický kmitočet $\omega_0 = 1 \text{ kHz}$ a činitel jakosti $Q_0 = 1$. Pasivní prvky byly zvoleny $C_{1,2} = 1 \text{ uF}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$. Byla dopočítána transkonduktance $g = 1 \text{ mS}$.

Střídavou analýzou byla ověřena funkčnost obvodu. K simulaci bylo využito tranzistorových modelů CDTA ukázaných na obrázku 19. Z průběhu zobrazených na grafu 1. je patrné že daný obvod realizuje všechny námi požadované propusti. Z průběhu grafů je též zřejmé, že výsledný filtr má požadované vlastnosti, především charakteristický kmitočet $\omega_0 = 1 \text{ kHz}$, strmost 40 dB/dek. , což je podmínka pro dolní a horní propust 2. řádu a 20 dB/dek. , což je požadavek pro pásmovou propust.

2.1.2 Multifunkční kmitočtový filtr se dvěma CDTA

Jde o obvod se dvěma prvky CDTA a dvěma admitančními prvky, za které byly následně dosazeny dva kondenzátory. Jedná se o upravenou variantu zapojení z obr. 10, kde vstupní dělič proudu je nahrazen proudovým integrátorem.



Obr. 10: Multifunkční filtr se dvěma CDTA.

Byla získána charakteristická rovnice (11), proudové přenosové funkce (12, 13, 14) a následně dopočítané vzorce pro charakteristický kmitočet (15) a činitel jakosti (16). Z přenosových funkcí je patrné že uvedený filtr lze realizovat v dolní (Io3), horní (Io1) a pásmové propusti (Io2).

$$D(p) = p^2(C_1C_2) + p(g_1C_2) + g_1g_2 \quad (11)$$

$$K_{i1} = \frac{p^2(C_1C_2)}{D(p)} \quad (12)$$

$$K_{i2} = \frac{I_{o2}}{I_{IN}} = \frac{p(g_1C_2)}{D(p)} \quad (13)$$

$$K_{i3} = \frac{I_{o3}}{I_{IN}} = \frac{g_1g_2}{D(p)} \quad (14)$$

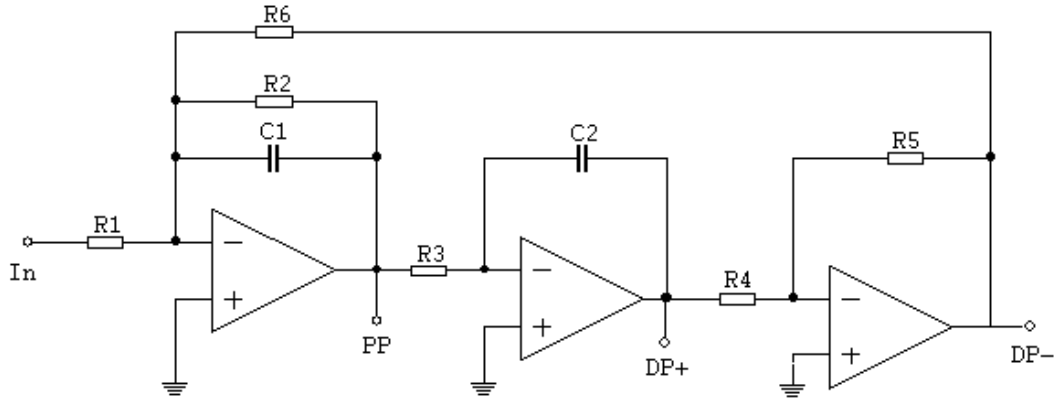
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_1g_2}{C_1C_2}} \quad (15)$$

$$Q_0 = \frac{1}{g_1C_2} \sqrt{g_1g_2C_1C_2} \quad (16)$$

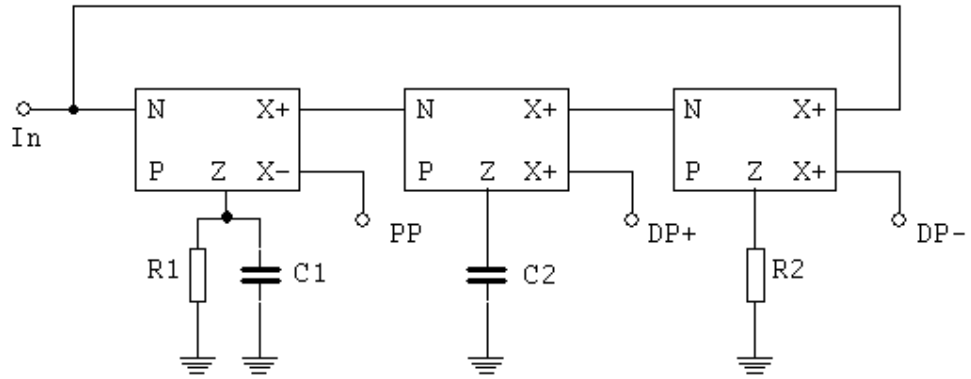
Obvod je navržen na $\omega_0 = 1kHz$, činitel jakosti $Q_0=1$. Pasivní prvky jsou zvoleny $C_{1,2} = 1 \mu F$. Dopočítány byly transkonduktance aktivních prvků $g_1 = 1 mS$, $g_2=1mS$. Obvod byl také odsimulován, průběhy jsou znázorněny na grafu 2. Z průběhu grafů je patrné, že výsledný filtr má požadované vlastnosti, především charakteristický kmitočet $\omega_0 = 1kHz$, strmota 40 dB/dek., což je podmínka pro dolní a horní propust 2. řádu a 20 dB/dek., což je požadavek pro pásmovou propust 2. řádu.

2.1.3 Topologie dva integrátory ve smyčce

Je využito možnosti převést napěťový integrátor na proudový s využitím CDTA. Napěťové vstupy a výstupy jsou nahrazeny proudovými. Jde o velmi známou topologii, kterou je možné realizovat jen dolní a pásmovou propust. Na obr. 11. je příklad filtru v topologii dvou integrátorů ve smyčce. Ten bude převeden na filtr s prvky CDTA, viz obr. 12.



Obr. 11: Kmitočtový filtr s OZ v topologii dvou integrátorů ve smyčce.



Obr. 12: Kmitočtový filtr s CDTA v topologii dvou integrátorů ve smyčce.

Charakteristická rovnice, přenosové funkce a vzorec pro výpočet charakteristického kmitočtu a činitele jakosti jsou v rovnicích (17-22). Z přenosových funkcí je patrné, že obvod umožňuje pásmovou propust na výstupu 1, dolní propust na výstupu 2 a invertovanou dolní propust na výstupu 3.

$$D(p) = p^2(R_1C_1C_2) + p(C_2) + g_1g_2g_3R_1R_2 \quad (17)$$

$$K_1(p) = \frac{I_{o1}}{I_{in}} = \frac{p(g_1C_2R_1)}{D(p)} \quad (18)$$

$$K_2(p) = \frac{I_{o2}}{I_{in}} = \frac{g_1g_2R_1}{D(p)} \quad (19)$$

$$K_3(p) = \frac{I_{o3}}{I_{in}} = \frac{-R_1R_2g_1g_2g_3}{D(p)} \quad (20)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_1 g_2 g_3 R_2}{C_1 C_2}} \quad (21)$$

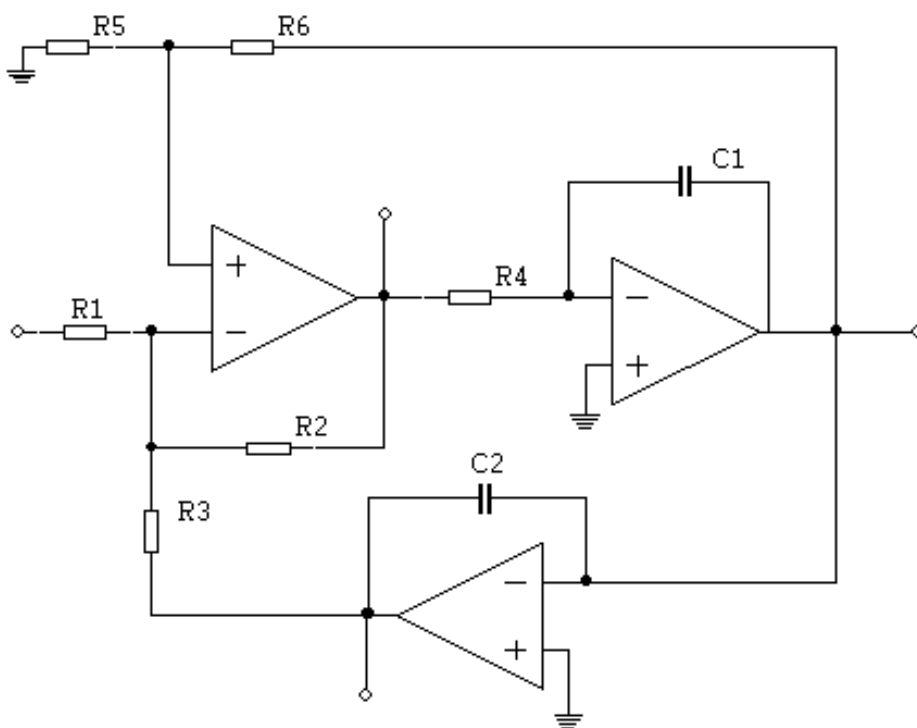
$$Q_0 = \frac{\sqrt{R_1 C_1 C_2 g_1 g_2 g_3 R_1 R_2}}{C_2} \quad (22)$$

Obvod je navržen na $\omega_0 = 1\text{kHz}$, činitel jakosti $Q_0=1$. Pasivní prvky jsou zvoleny $C_{1,2} = 1\text{ uF}$, $R_{1,2} = 1\text{ k}\Omega$. Dopočítány byly transkonduktance aktivních prvků $g_{1,2,3} = 1\text{ mS}$.

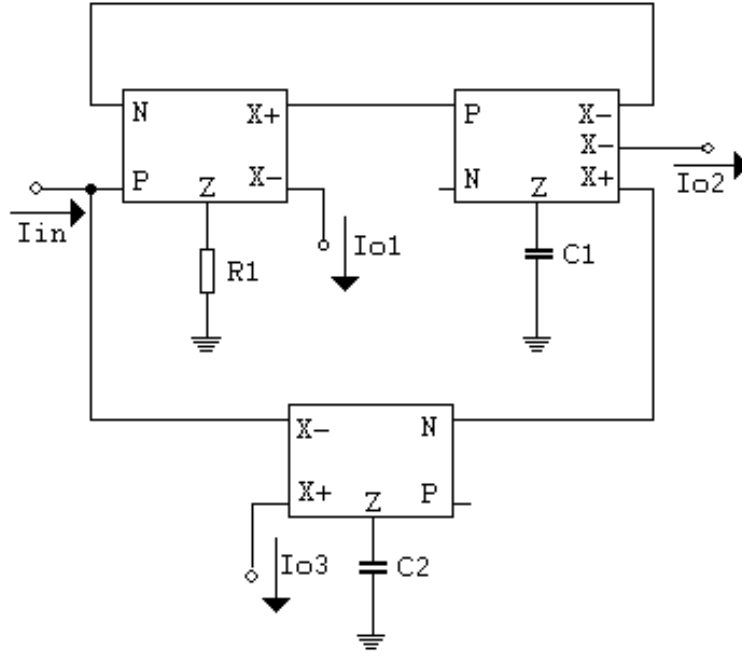
Na grafu číslo 3. je doložena správná funkčnost obvodu. Filtr funguje jako pásmová propust na výstupu 1 a jako dolní propust na výstupech 2 a 3. Charakteristický kmitočet i strmost opět odpovídají požadavkům.

2.1.4 KHN

Jde o topologii v níž může být využito 3 až 4 operační zesilovače, kdy 4. oz je využitý pro pásmovou zádrž. Je snadno laditelný, snadno změnitelný je jak charakteristický kmitočet, tak činitel jakosti.



Obr. 13: Kmitočtový filtr s OZ v topologii KHN.



Obr. 14: Kmitočtový filtr s CDTA v topologii KHN.

$$D(p) = p^2(C_1C_2) + p(R_1C_2g_1g_2) + 2R_1g_1g_2g_3 \quad (23)$$

$$K_{i1} = \frac{p^2(C_1C_2)}{D(p)} \quad (24)$$

$$K_{i2} = \frac{I_{o2}}{I_{IN}} = \frac{p(R_1C_2g_1g_2)}{D(p)} \quad (25)$$

$$K_{i3} = \frac{I_{o3}}{I_{IN}} = \frac{2R_1g_1g_2g_3}{D(p)} \quad (26)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2R_1g_1g_2g_3}{C_1C_2}} \quad (27)$$

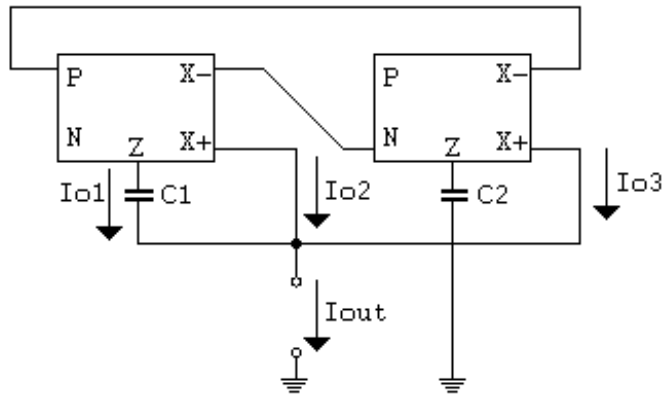
$$Q_0 = \frac{1}{R_1C_2g_1g_2} \sqrt{2R_1C_1C_2g_1g_2g_3} \quad (28)$$

Obvod je navržen na $\omega_0 = 1kHz$, činitel jakosti $Q_0=1$. Pasivní prvky jsou zvoleny $C_{1,2} = 1 \mu F$, $R_1 = 1 k\Omega$. Dopočítány byly transkonduktance aktivních prvků $g_{1,2} = 1 \text{ mS}$, $g_3 = 0,5 \text{ mS}$. Ověření funkčnosti filtru je patrné na grafu č. 4. Z průběhu grafů je patrné, že výsledný filtr má požadované vlastnosti, především charakteristický

kmitočet $\omega_0 = 1kHz$, strmost 40 dB/dek., což je podmínka pro dolní a horní propust 2. řádu a 20 dB/dek., což je požadavek pro pásmovou propust 2. řádu.

2.2 Oscilátory

Metodou autonomního obvodu byl navržen oscilátor generující harmonické kmity. Na tvaru přenosové funkce vidíme že obvod splňuje podmínku oscilace, kdy jde o všepropustný článek (jsou sečteny proudové výstupy 1, 2, a 3) a činitel jakosti jde k nekonečnu, tzn. člen s p na prvu ve jmenovateli přenosové funkce je roven nule [6].



Obr. 13: Oscilátor s CDTA.

$$D(p) = p^2(C_1C_2) + g_1g_2 \quad (29)$$

$$K_i = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{I_{O1} + I_{O2} + I_{O3}}{I_{IN}} = \frac{p^2(C_1C_2) + p(g_1C_2) + g_1g_2}{D(p)} \quad (30)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_1g_2}{C_1C_2}} \quad (31)$$

Požadovaný charakteristický kmitočet volíme $\omega_0 = 10Hz$, $C=10mF$, vypočtené $g=1mS$.

V grafu 5 je zobrazen průběh proudu na výstupu získaný přechodovou analýzou. Je z něj patrné že signál má periodu $T=0,65s \gg f_0=1,54Hz \gg \omega_0 = 2\pi f_0 = 9,67Hz \cong 10Hz$.

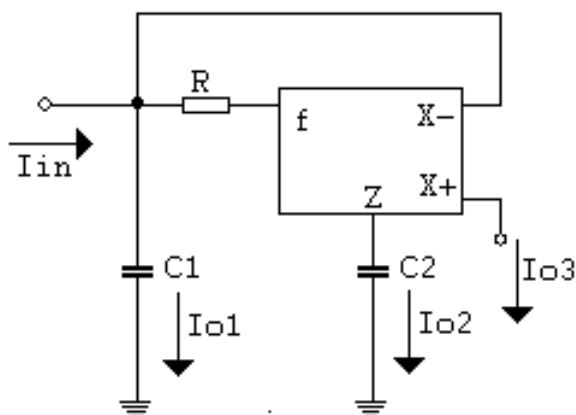
3 VYUŽITÍ CFTA

Kapitola 3 popisuje základní využití prvku CFTA v různých strukturách. Demonstrovány jsou tři aktivní kmitočtové filtry a jeden oscilátor s prvky CFTA.

3.1 Kmitočtové filtry

Jak již bylo řečeno v kapitole 1, spoustu obvodových struktur s CDTA lze realizovat pomocí prvku CFTA. Především u obvodů, kde je využit jen jeden vstup prvku CDTA. Dojde tak k obvodovému zjednodušení.

Na obrázku 14 je demonstrováno zjednodušení obvodu z kapitoly 2.1.1. Jde o multifunkční kmitočtový filtr druhého řádu s jedním prvkem CFTA, dvěma kondenzátory a jedním rezistorem. Vlastnosti filtru jsou popsány rovnicemi (32-37).



Obr. 14: Kmitočtový filtr s jedním CFTA.

$$D(p) = p^2(R_1C_1C_2) + p(C_2) + g \quad (32)$$

$$K_{i1} = \frac{I_{o1}}{I_{IN}} = \frac{p^2(C_1C_2R)}{D(p)} \quad (33)$$

$$K_{i2} = \frac{I_{o2}}{I_{IN}} = \frac{p(C_2)}{D(p)} \quad (34)$$

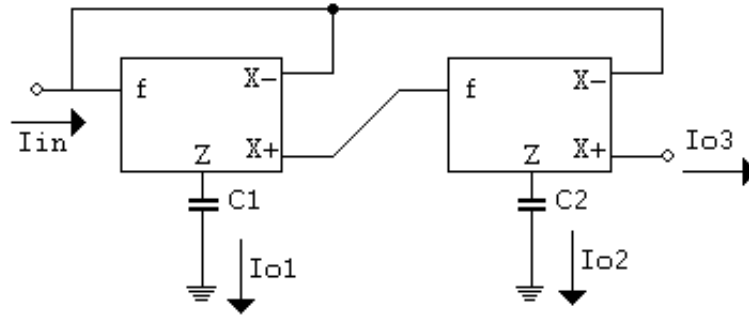
$$K_{i3} = \frac{I_{o3}}{I_{IN}} = \frac{g}{D(p)} \quad (35)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{R_1C_1C_2}} \quad (36)$$

$$Q_0 = \frac{1}{C_2} \sqrt{R_1 C_1 C_2 g} \quad (37)$$

Obvod je navržen na $\omega_0 = 1\text{kHz}$, činitel jakosti $Q_0=1$. Pasivní prvky jsou zvoleny $C_{1,2} = 1\text{ uF}$, $R_1 = 1\text{ k}\Omega$. Byla dopočítána transkonduktance $g = 1\text{ mS}$. Ověření funkčnosti filtru je patrné na grafu č. 6.

Jako další alternativu můžeme využít obvod na obrázku 15. Jde o multifunkční kmitočtový filtr se dvěma prvky CFTA a dvěma kondenzátory, jehož vlastnosti jsou popsány rovnicemi (38-43).



Obr. 15: Kmitočtový filtr se dvěma CFTA.

$$D(p) = p^2(C_1 C_2) + p(g_1 C_2) + g_1 g_2 \quad (38)$$

$$K_{i1} = \frac{I_{O1}}{I_{IN}} = \frac{C_1 C_2}{D(p)} \quad (39)$$

$$K_{i2} = \frac{I_{O2}}{I_{IN}} = \frac{g_1 C_2}{D(p)} \quad (40)$$

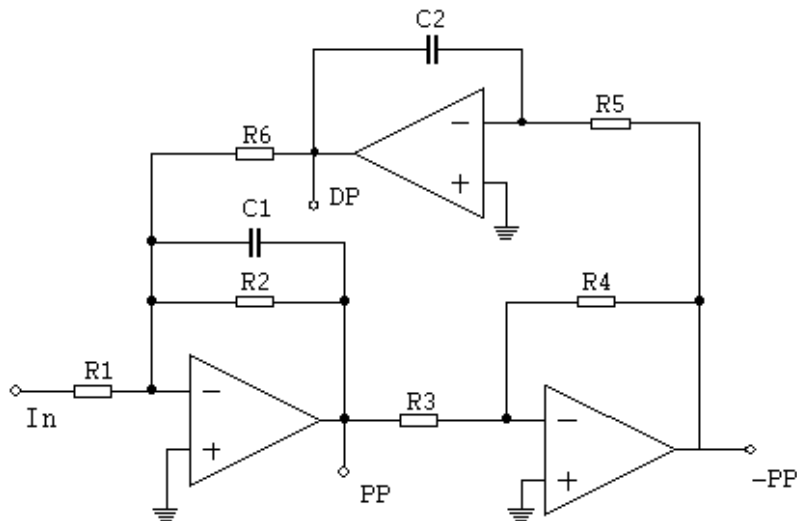
$$K_{i3} = \frac{I_{O3}}{I_{IN}} = \frac{g_1 g_2}{D(p)} \quad (41)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{gg}{C_1 C_2}} \quad (42)$$

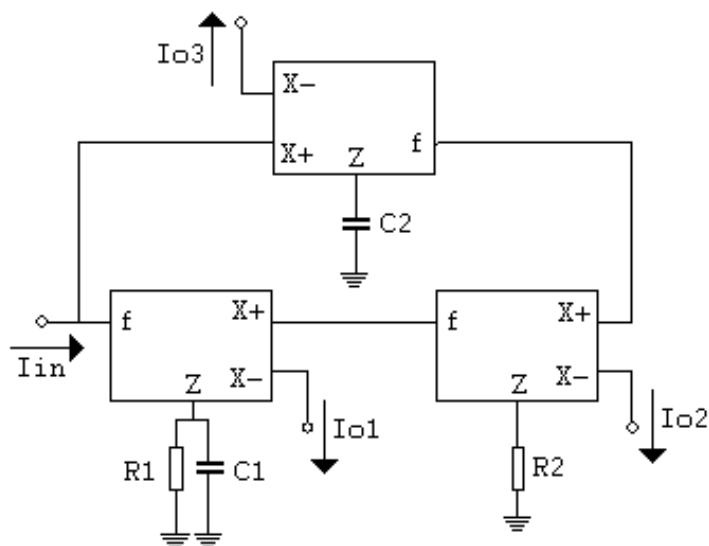
$$Q_0 = \frac{1}{g_1 C_2} \sqrt{C_1 C_2 gg} \quad (43)$$

Obvod je navržen na $\omega_0 = 1\text{kHz}$, činitel jakosti $Q_0=1$. Pasivní prvky jsou zvoleny $C_{1,2} = 1\text{ uF}$. Byla dopočítána transkonduktance $g_{1,2} = 1\text{ mS}$. Ověření funkčnosti filtru je zobrazené na grafu č. 7, z něhož je patrné, že obvod má požadované vlastnosti.

Dále je demonstrována možnost realizace topologie dvou integrátorů ve smyčce pro obdobný obvod jako v kapitole 2. Na obrázku 16 je zobrazen filtr 2. řádu v zapojení se třemi operační zesilovači, realizující dolní a dvě pásmové propusti, z nichž jedna je invertovaná. Výše zmíněným postupem je převeden na filtr na obrázku 17. Rovnice (44-49) popisují vlastnosti obvodu.



Obr. 16: Kmitočtový filtr s OZ v topologii dvou integrátorů ve smyčce.



Obr. 17: Kmitočtový filtr s CFTA v topologii dvou integrátorů ve smyčce.

$$D(p) = p^2(R_1 C_1 C_2) + p(C_2) + (R_1 R_2 g_1 g_2 g_3) \quad (44)$$

$$K_{i1} = \frac{I_{o1}}{I_{IN}} = \frac{p(R_1 C_2 g_1)}{D(p)} \quad (45)$$

$$K_{i2} = \frac{I_{o2}}{I_{IN}} = \frac{-p(R_1 R_2 C_2 g_1 g_2)}{D(p)} \quad (46)$$

$$K_{i3} = \frac{I_{o3}}{I_{IN}} = \frac{R_1 R_2 g_1 g_2 g_3}{D(p)} \quad (47)$$

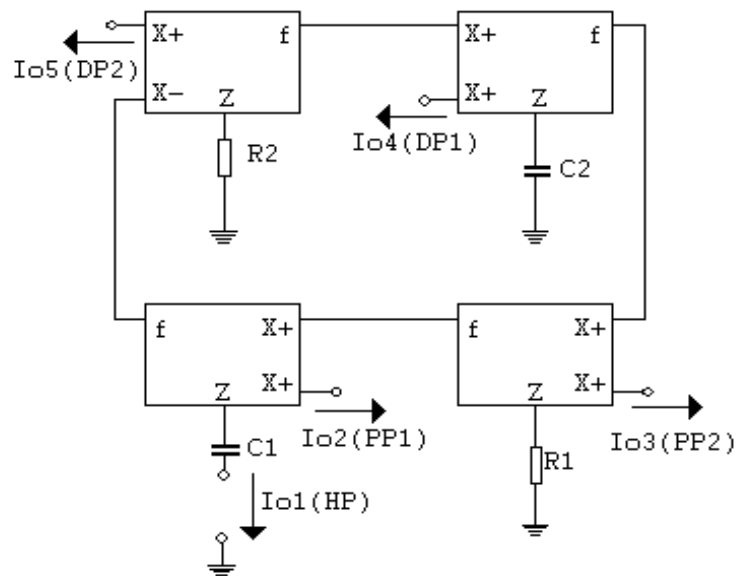
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_2 g_1 g_2 g_3}{C_1 C_2}} \quad (48)$$

$$Q_0 = \frac{1}{C_2} \sqrt{R_1^2 R_2 C_1 C_2 g_1 g_2 g_3} \quad (49)$$

Obvod je navržen na $\omega_0 = 1\text{kHz}$, činitel jakosti $Q_0=1$. Pasivní prvky jsou zvoleny $C_{1,2} = 1\text{ uF}$, $R_{1,2}=1\text{k}\Omega$. Byla dopočítána transkonduktance $g_{1,2,3} = 1\text{ mS}$. Ověření funkčnosti filtru je zobrazeno na grafu č. 8. Je zřejmé, že filtr má požadované vlastnosti.

3.2 Oscilátory

Metodou autonomního obvodu byl nalezen následující oscilátor. Jde o obvod se čtyřmi prvky CFTA, dvěma kondenzátory a dvěma rezistory. Výstup oscilátoru volíme jako součet dílčích výstupů I_{o1} , I_{o3} a I_{o5} .



Obr. 18: Oscilátor s CFTA.

$$D(p) = p^2(C_1C_2) + g_1g_2g_3g_4R_1R_2 \quad (50)$$

$$K_I = \frac{I_{O1} + I_{O3} + I_{O5}}{I_{IN}} = \frac{p^2(C_1C_2) + p(g_1g_2R_1C_2) + g_1g_2g_3g_4R_1R_2}{D(p)} \quad (51)$$

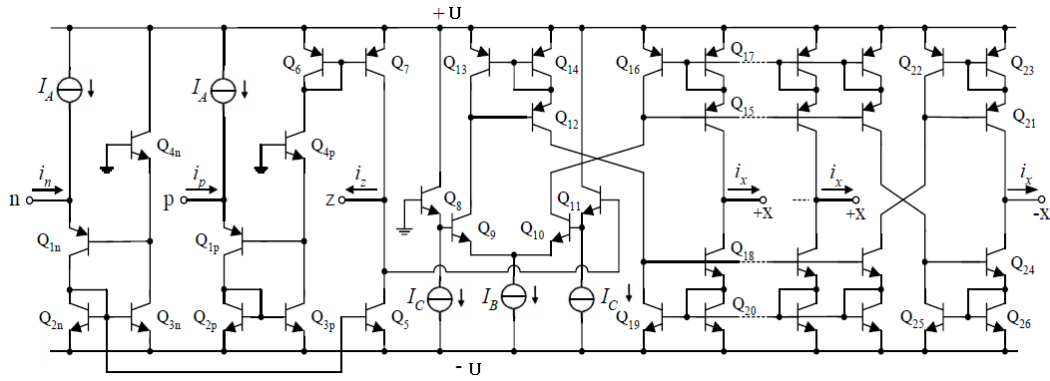
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_1g_2g_3g_4R_1R_2}{C_1C_2}} \quad (52)$$

Kmitočet volíme 10Hz, C=10mF, R=1kΩ, vypočtené g=1mS. V grafu 9 je zobrazen průběh proudu na výstupu získaný přechodovou analýzou. Je z něj patrné že signál má periodu T=0,75s >> f₀=1,33Hz >> ω₀ = 2πf₀ = 8,35Hz.

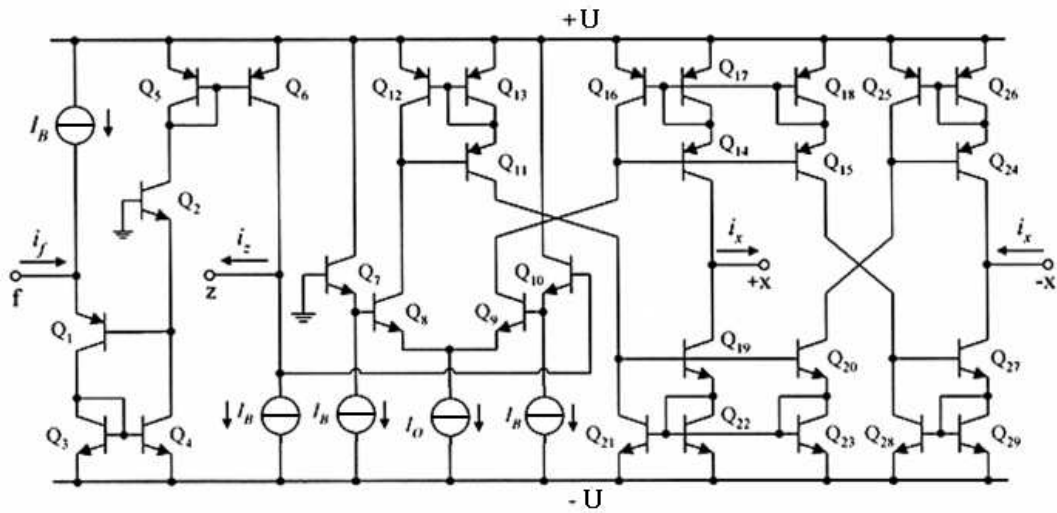
4 SIMULACE

4.1 Knihovny prvků

K simulaci v programu MicroCap byla vytvořena knihovna prvků CDTA a CFTA jejichž obvodová struktura je znázorněna na obrázcích 19 a 20 [6][7]. Pro prvek CDTA volíme $U = \pm 3V$, $I_A = 100\mu A$, $I_C = 50\mu A$, $I_B = g2U_T$, kde $U_T = 26mV$ při $27^\circ C$. Pro prvek CFTA platí $U = \pm 3V$, $I_B = 100\mu A$, $I_0 = g2U_T$, kde $U_T = 26mV$ při $27^\circ C$. V obou případech jsou použity tranzistory NR100N a PR100N z rodiny ALA400, jejichž spice parametry jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.



Obr. 19: Realizace prvku CDTA.



Obr. 20: Realizace prvku CFTA.

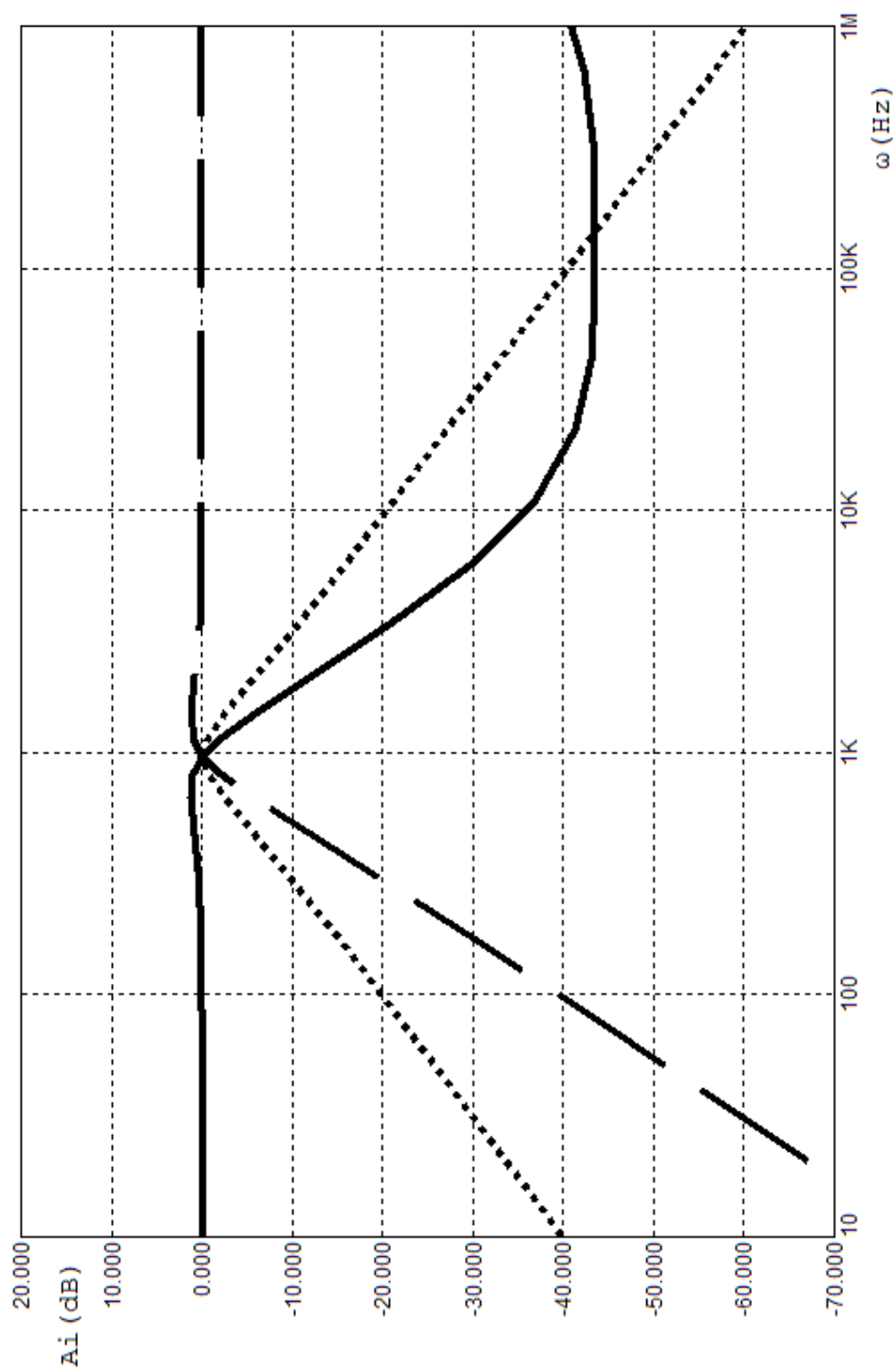
IS	121E-18	BF	137.5
VAF	159.4	IKF	6.974E-3
ISE	36E-16	NE	1.713
BR	0.7258	VAR	10.73
IKR	2.198E-3	RE	1
RB	524.6	RBM	25
RC	50	CJE	0.214E-12
VJE	0.5	MJE	0.28
CJC	0.983E-13	VJC	0.5
MJC	0.3	XCJC	0.034
CJS	0.913E-12	VJS	0.64
MJS	0.4	FC	0.5
TF	0,425E-8	TR	0,5E-8
EG	1,206	XTB	1,538
XT1	2		

Tab. 1: Parametry tranzistoru NR100N.

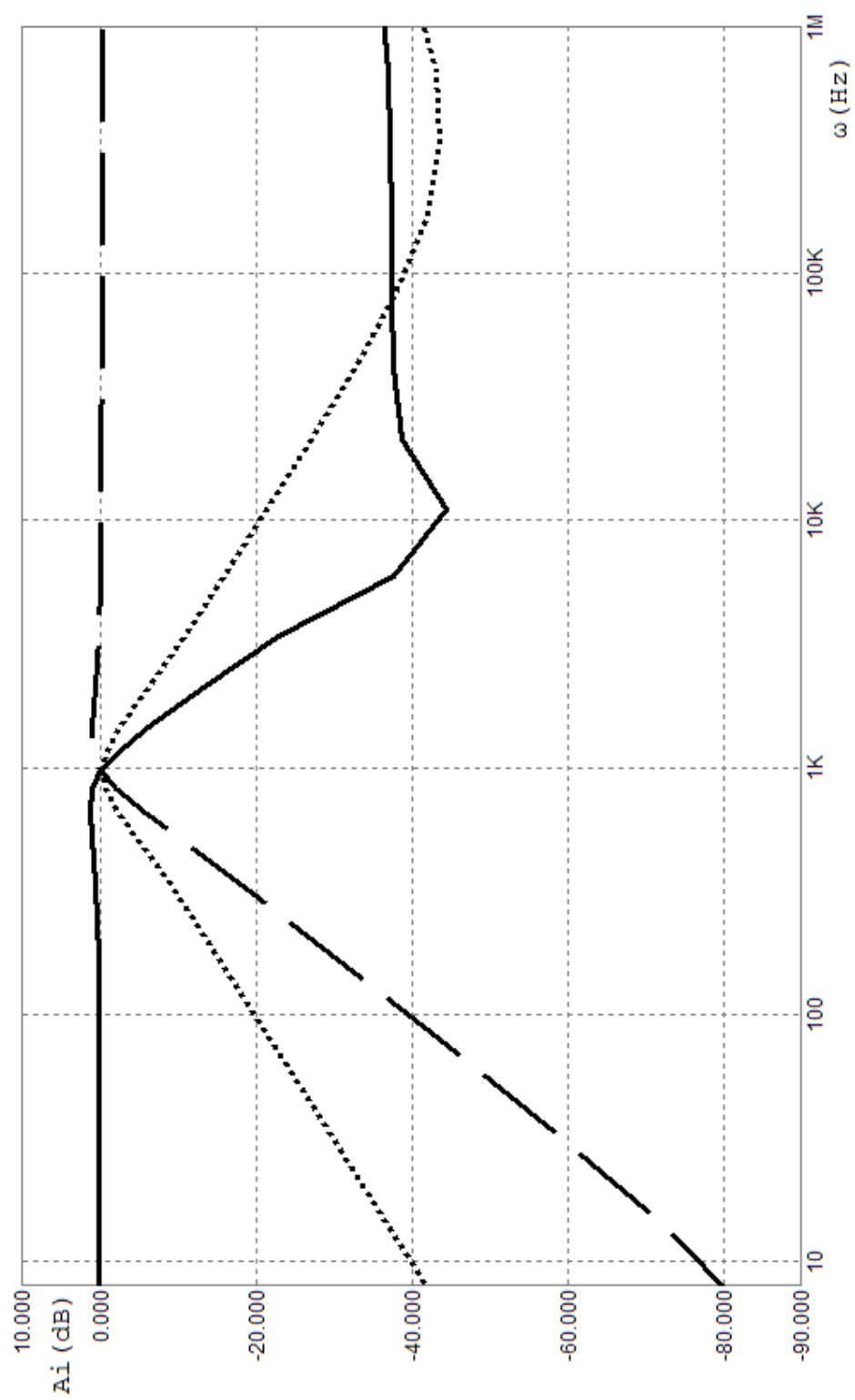
IS	73.5E-18	BF	110
VAF	51.8	IKF	2.359E-3
ISE	25.1E-16	NE	1.650
BR	0.4745	VAR	9.96
IKR	6.478E-3	RE	3
RB	327	RBM	24.55
RC	50	CJE	0.18E-12
VJE	0.5	MJE	0.28
CJC	0.164E-12	VJC	0.8
MJC	0.4	XCJC	0.037
CJS	1.03E-12	VJS	0.55
MJS	0.35	FC	0.5
TF	0.610E-9	TR	0.610E-8
EG	1.206	XTB	1.866
XT1	1.7		

Tab. 2: Parametry tranzistoru PR100N.

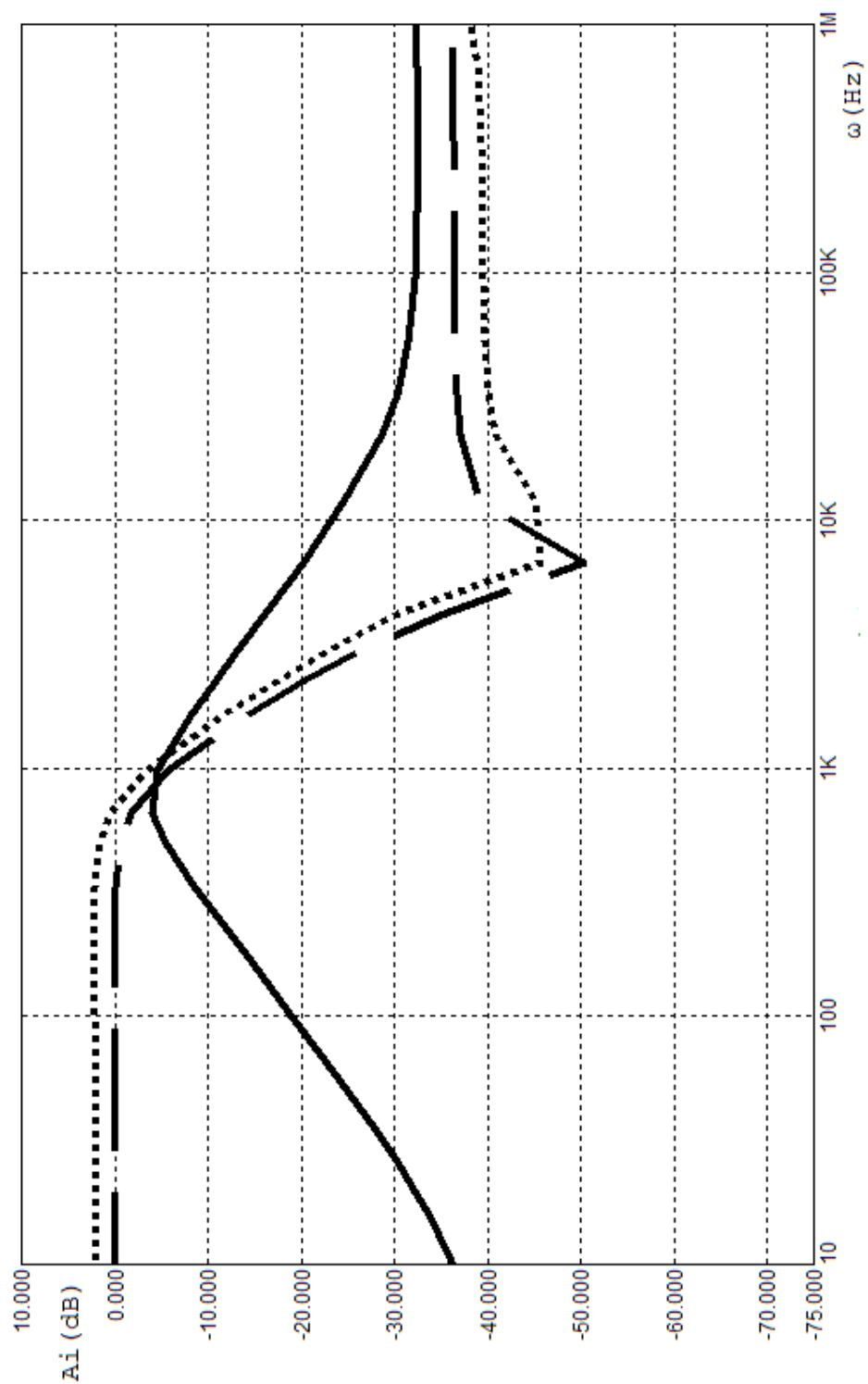
4.2 Výsledky simulace



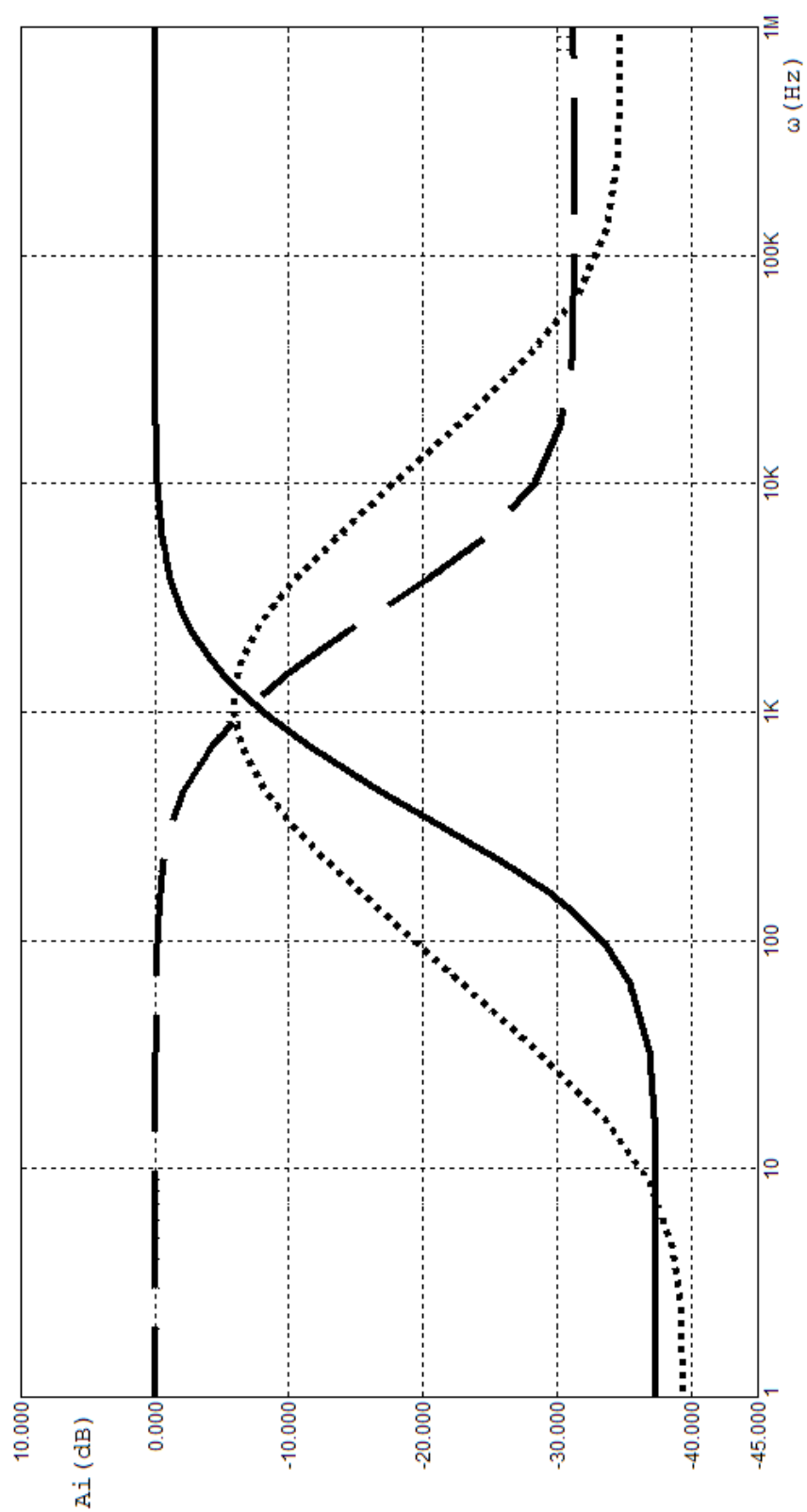
Graf 1: Modulová charakteristika kmitočtového filtru s 1 CDTA.



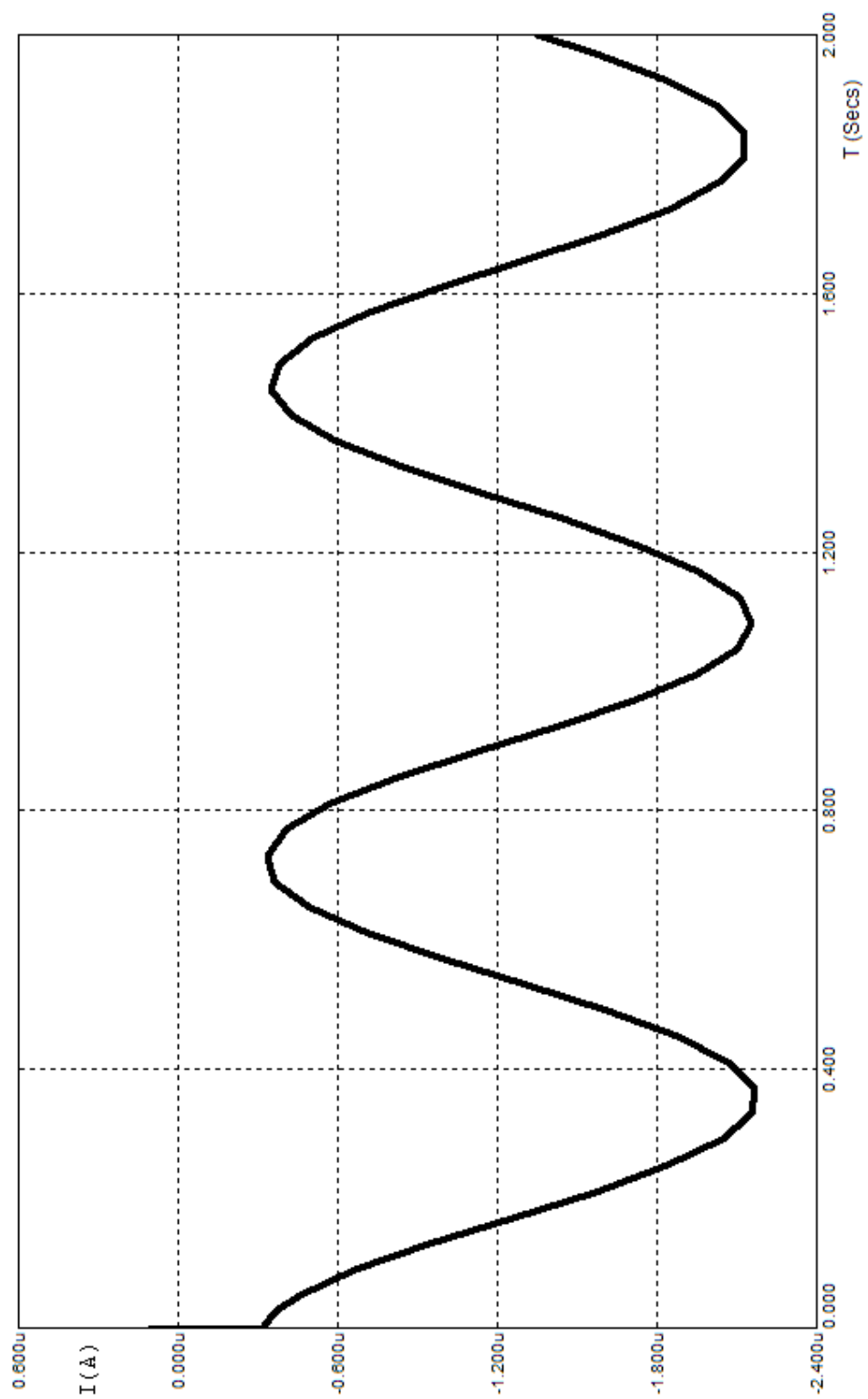
Graf 2: Modulová charakteristika kmitočtového filtru se 2 CDTA.



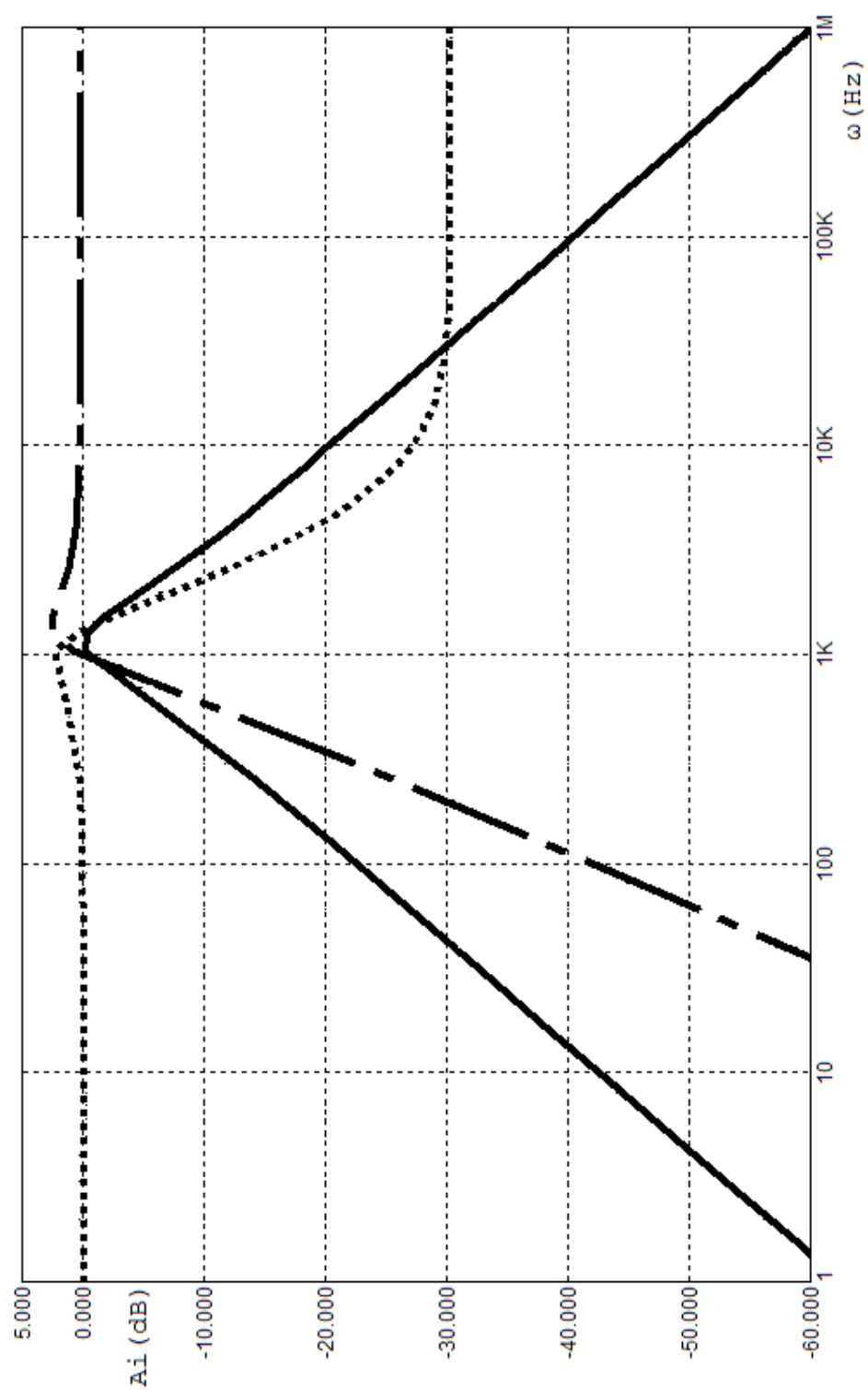
Graf 3: Modulová charakteristika kmitočtového filtru v topologii dvou integrátorů ve smyčce s CDTA.



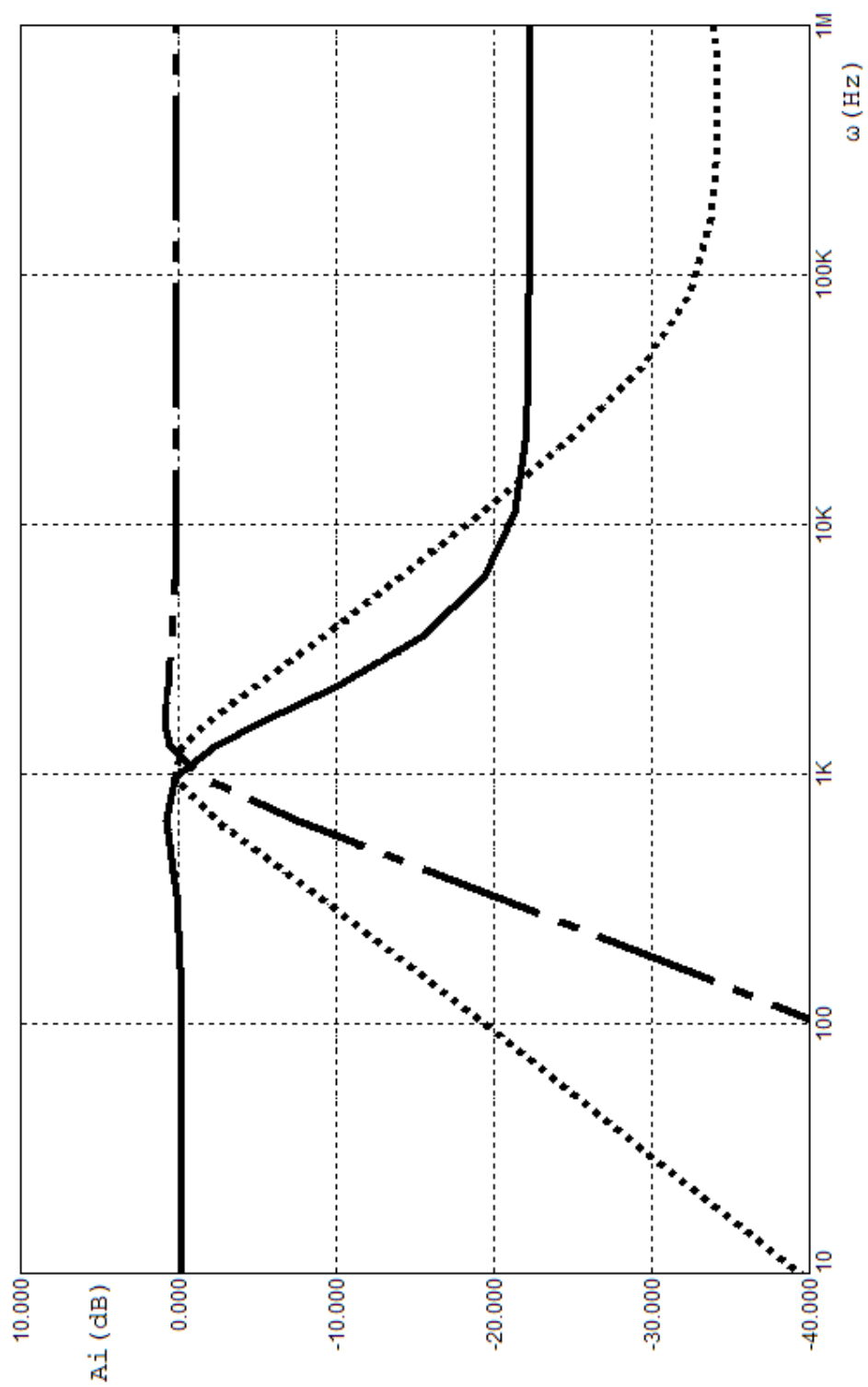
Graf 4: Modulová charakteristika filtru KHN s CDTA.



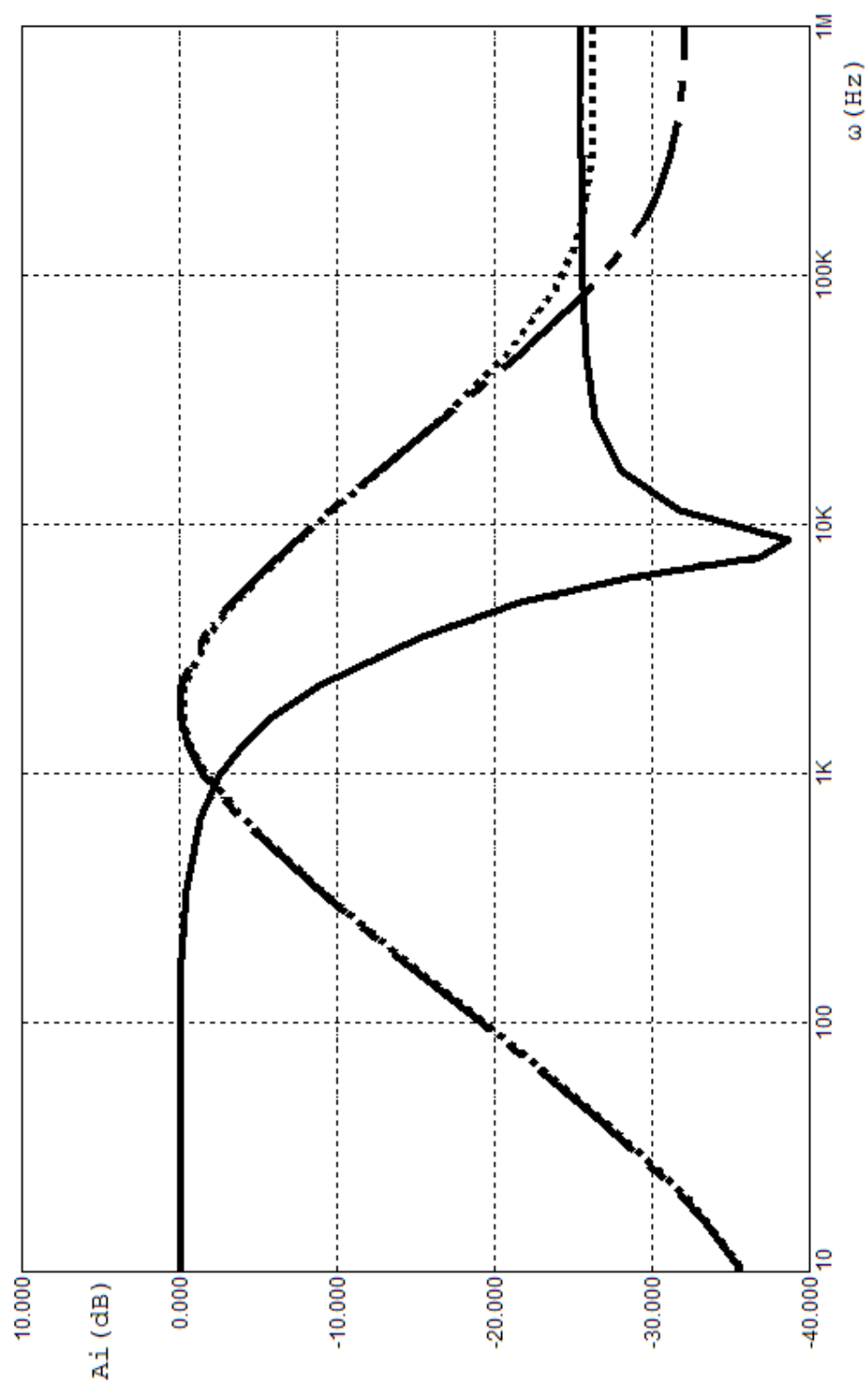
Graf 5: Časový průběh proudu na výstupu oscilátoru s CDTA.



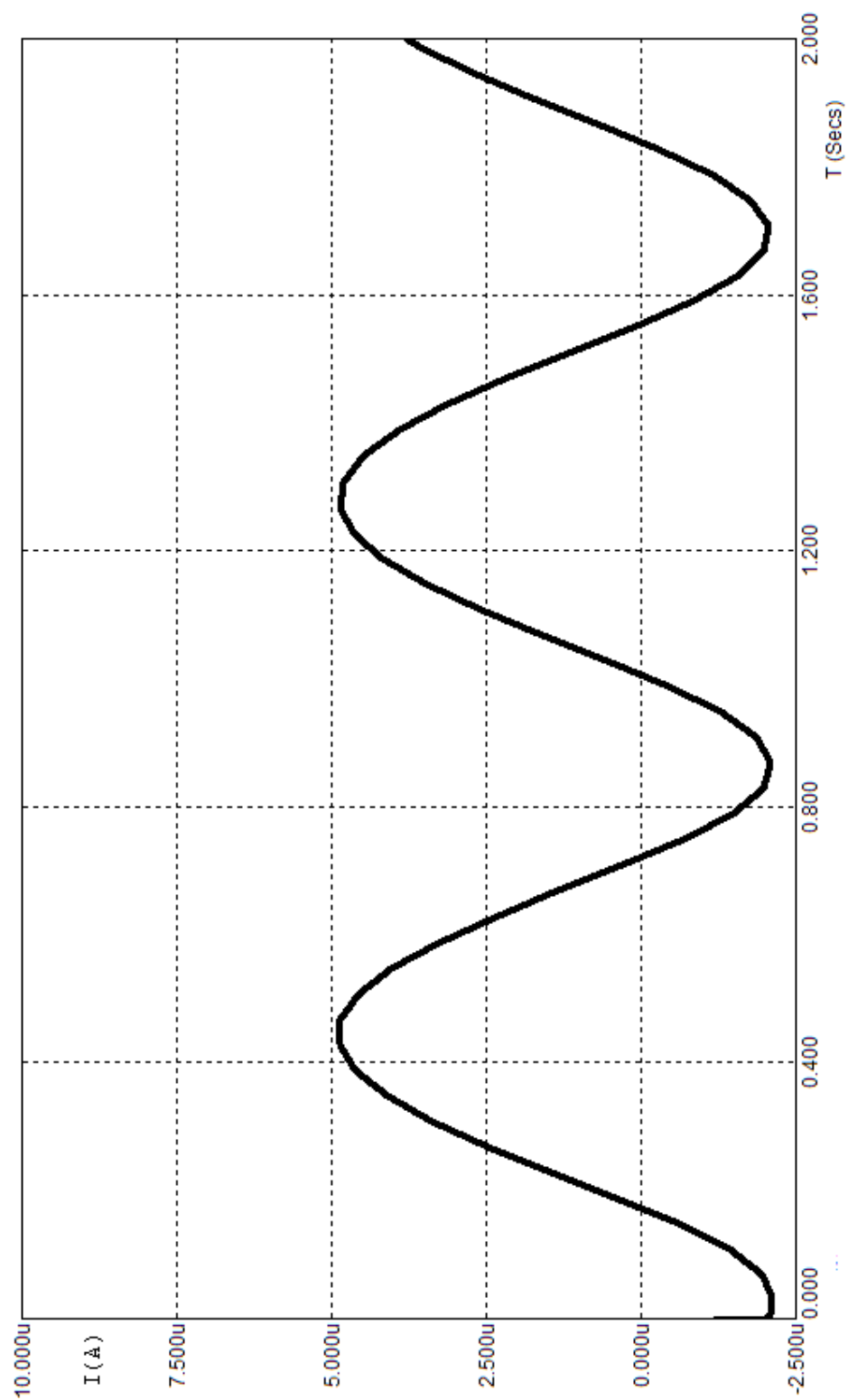
Graf 6: Modulová charakteristika filtru s jedním CFTA.



Graf 7: Modulová charakteristika filtru se dvěma CFTA.



Graf 8: Modulová charakteristika filtru v topologii dvou integrátorů ve smyčce s CFTA.



Graf 9: Časový průběh proudu na výstupu oscilátoru s CFTA.

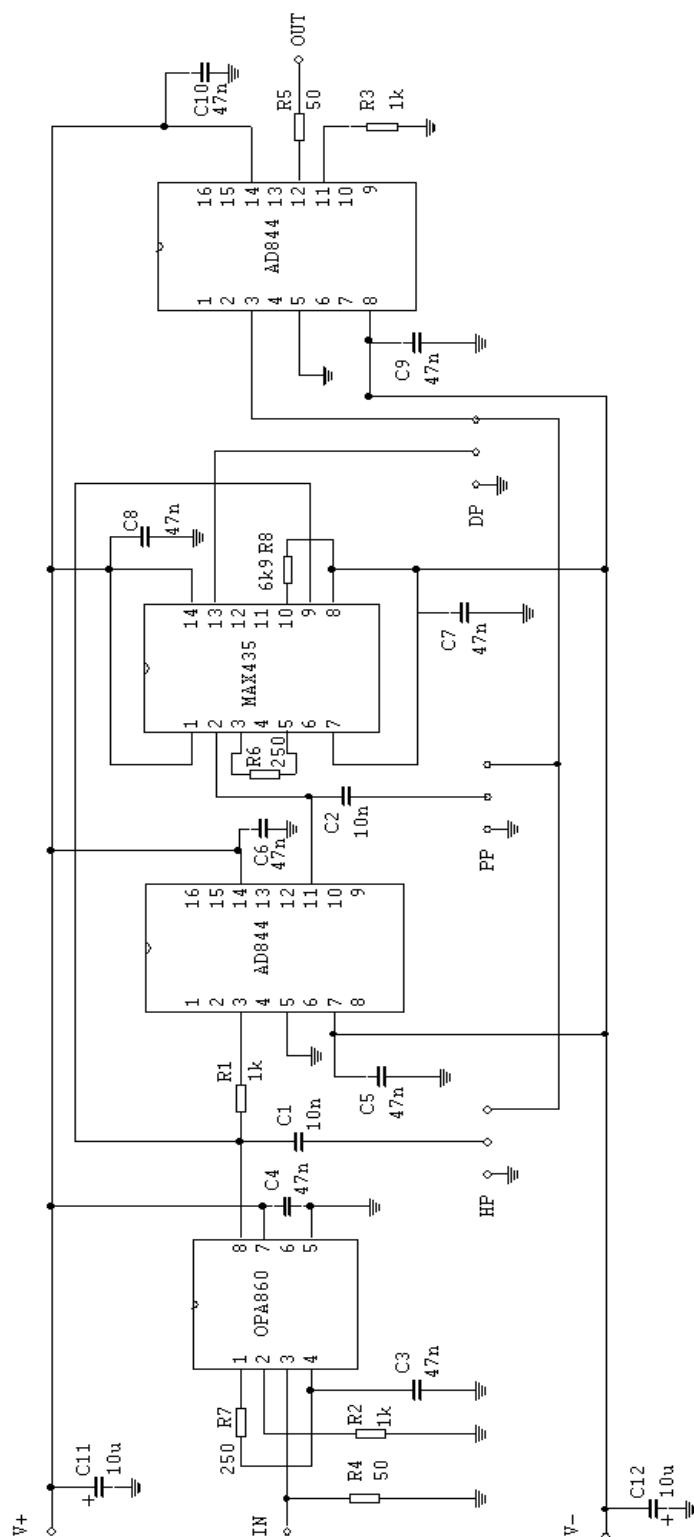
5 PRAKTICKÁ REALIZACE

Jako demonstrace funkčnosti navržených schémat byl vybrán kmitočtový filtr druhého řádu s jedním prvkem CFTA pracující jako dolní, horní i pásmová propust dle zapojení viz obr. 14. CFTA je možné realizovat sériovým spojením prvků AD844 jako proudového sledovače a MAX435 jako transkonduktančního zesilovače, jak je uvedeno na obr. 8. V součinnosti s kondenzátory C1 a C2 a rezistorem R1 tvoří základ filtru. Obvod je navržen pro mezní kmitočet 100kHz. Hodnoty součástek jsou voleny $R1=1k\ \Omega$, $C1=10nF$, $C2=10nF$ a transkonduktance $g=1mS$.

OPA860 slouží jako vstupní převodník napětí na proud, druhý AD844 jako výstupní převodník proud na napětí. Jednotlivé výstupy filtru jsou vyvedeny na jumpery. Přepínáním jumperů docílíme změny propusti (dolní horní, pásmová). Tyto propojky jsou spojeny s převodníkem, na jehož výstupu je možné měřit výstupní signál.

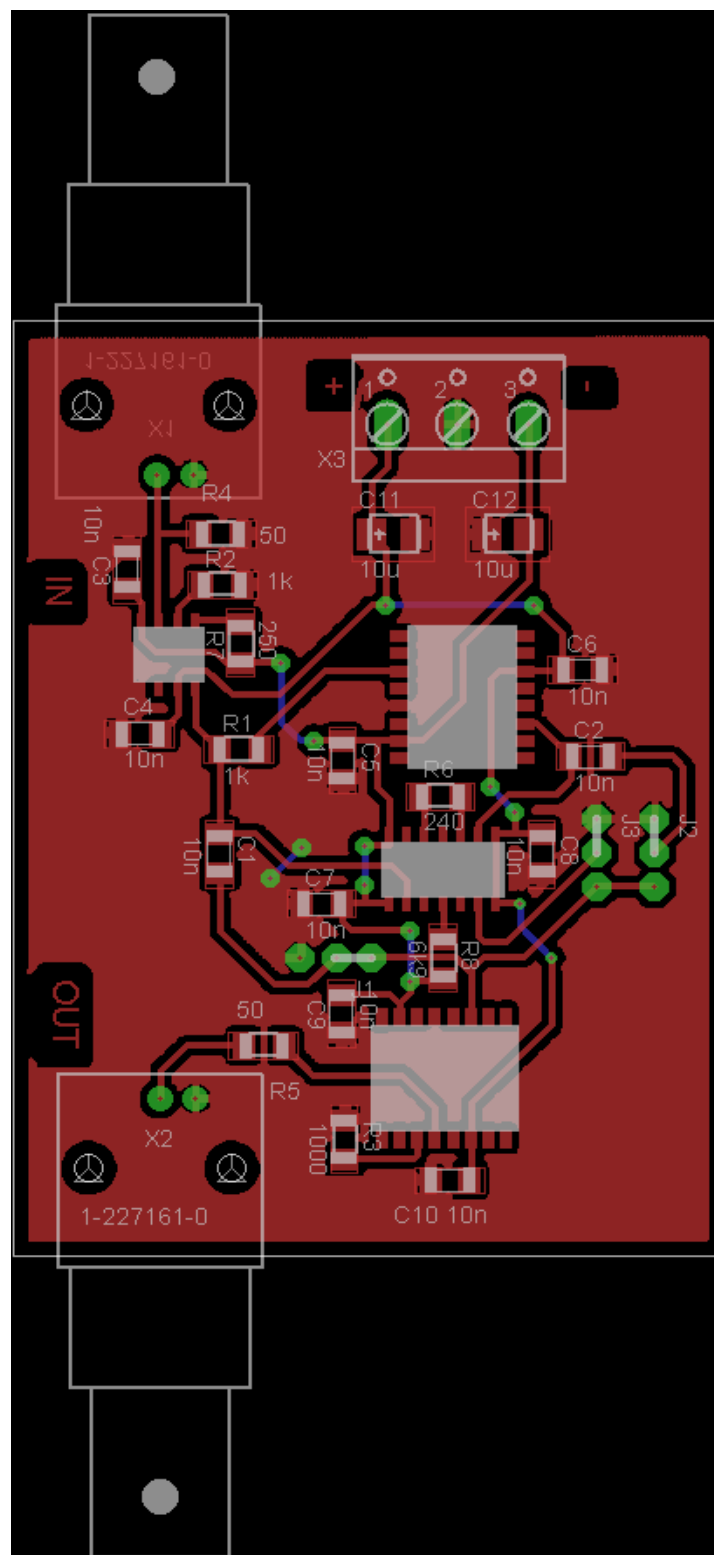
Rezistorem R6, připojeného k MAX435, je nastavena transkonduktance prvku CFTA. Byly použity součástky v dostupných řadách nejbližší k hodnotám teoreticky vypočítaným. PBC deska je v SMD variantě. Na obrázku 21 je znázorně elektrické zapojení obvodu. Obr. 22 ukazuje návrh PBC desky.

5.1 Schéma zapojení



Obr. 21: Elektrické schéma praktické realizace filtru.

5.2 Návrh desky



Obr. 22: Návrh desky plošných spojů.

5.3 Seznam součástek

WAGO-500		
konektor coax. kabelu		2x
jumper 2,5mm		3x
kondenzátory tantalové	10uF	C11, C12
kondenzátory elektrolytické	47 nF	C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 C10
	10 nF	C1,C2
rezistory	51 Ω	R4, R5
	240 Ω	R6, R7
	1k Ω	R1, R2, R3
	6k9 Ω	R8
AD844		2x
MAX435		
OPA860		

Tabulka 3: Seznam součástek.

5.4 Měření

Realizovaný obvod byl podroben měření stejnosměrných (napájecích) i střídavých (signálových) poměrů. Stejnosměrné poměry, proměřené multimetrem byly po celém obvodu konstantní a splňovaly podmínky pro napájení aktivních prvků ($\pm 5V$).

Problém nastal v měření signálu ve filtru. Obvod byl pravděpodobně vystaven neúměrným nárokům při pájení ze strany konstruktéra a tudíž došlo k poškození integrovaných obvodů. Prvek AD844, jakožto vstupní část prvku CFTA, již nebylo možné kvůli absenci náhradní součástky ověřit. Nešlo tedy vyzkoušet funkčnost celého filtru.

6 ZÁVĚR

Bylo ukázáno základní aplikační využití prvků CDTA a CFTA u multifunkčních kmitočtových filtrů, čehož bylo dosaženo metodou autonomních obvodů. Dále byla ukázána možnost realizace filtrů v topologii dvou integrátorů ve smyčce a KHN podle předlohy filtrů s operačními zesilovači. Dále byly ukázány základní zapojení oscilátorů. Na grafech získaných střídavou analýzou byla demonstrována funkčnost filtrů, přechodovou analýzou funkčnost oscilátorů.

Grafy prokazují, že navržené obvody se chovají podle předpokladů. Jde především o hodnoty mezních kmitočtů, typy propustí a strmost u filtrů a kmitočet signálu u oscilátoru. Bohužel vlivem reálných parametrů prvku CDTA/CFTA, které lze u tranzistorového modelu jen těžko ovlivnit, došlo ke zkreslení průběhů grafů oproti ideálnímu stavu, především k nežádoucím zákmitům u střídavé analýzy filtrů. Stejný problém bude pravděpodobně příčinou, proč navržené oscilátory plní svoji funkci jen pro nižší kmitočty, řádově jen do 1kHz. Tento problém by mohl být odstraněn vytvořením jiného modelu, než tranzistorového.

Jedno z navržených zapojení bylo vybráno k praktické realizaci. Jde o filtr druhého řádu s jedním prvkem CFTA. Tato součástka byla zkonstruována syntézou prvků AD844 jako proudového sledovače a MAX435 jako transkonduktanční zesilovač. Byla vyrobena a patřičnými prvky osazena PBC deska v SMD provedení. Bohužel testovaný vzorek nebyl funkční. Došlo pravděpodobně k poškození integrovaného obvodu CFTA prvkem vysokou teplotou v průběhu pájení součástek.

LITERATURA

- [1] BIOLEK, D. CDTA - building block for CM analog signal processing. In Proceeding of European conference on circuit theory and design ECCCTD'03, Krakow (Poland), 2003, p. III- 397 - 400.
- [2] D. Biolek, and V. Biolkova, "Universal biquads using CDTA elements for cascade filter design", Proceedings of the CSCC 2003, Corfu, Greece, 2003.
- [3] D. Biolek, "CDTA-Building block for current-mode analog signal processing", Proceedings of the ECCTD'03, vol.3, Krakow, Poland, pp.397-400, 2003.
- [4] HERENCŠÁR, N.; KOTON, J.; VRBA, K. Univerzální Kmitočtový Filtr s Novými Proudovými Prvky CFTA. *Elektrorevue - Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2009, roč. 2009, č. 57, s. 1-6. ISSN: 1213- 1539.
- [5] D. Biolek and Z. Kolka, SNAP – symbolic, semisymbolic, and numerical analysis of electronic circuits. User guide available: <http://snap.webpark.cz/indexa.html>.
- [6] MARUNGREANG, N.; Tanjaroen, W.; Pukkalanun, T.; Tangsrirat, W. "Electronically Tunable Phase Shifter Using CDTAs". Proceeding of Asia-Pacific Signal and Information Processing Association, 2009, 311-314.
- [7] W. Tangsrirat, "Novel current-mode and voltage-mode universal biquad filters using single CFTA", *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol.17, pp.99-104, 2010.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

BOTA	Balanced output transconductance amplifier
CC	Current conveyor
CDTA	Current differencing transconductance amplifier
CF	Current follower
CFTA	Current follower transconductance amplifier
CDS	Current differencing source
KHN	Kerwin-Huelsman-Newcomb
MOTA	Multiple output transconductance amplifier
OTA	Operational transconductance amplifier
OZ	Operational amplifier
PBC	Printed circuit boards
SMD	Surface mount device

Činitel jakosti	$Q=[-]$
Kapacita	$c=[F]$
Kmitočet	$\omega=[Hz]$
Odpor	$R=[\Omega]$
Přenos	$K=[-]$
Transkonduktance	$g=[S]$